

基于微透镜阵列的半导体激光器堆栈匀化系统

雷呈强¹ 汪岳峰¹ 殷智勇² 尹韶云³ 孙秀辉³

¹军械工程学院电子与光学工程系, 河北 石家庄 050003

²装备学院航天指挥系, 北京 101416

³中国科学院重庆绿色智能技术研究院集成光电技术研究中心, 重庆 400714

摘要 半导体激光器由于自身波导结构的不对称性导致光强分布不均匀而限制了其应用, 为了对半导体激光光束进行整形以获得均匀光斑, 设计了一种基于微透镜阵列的半导体激光器堆栈匀化系统。分析了微透镜阵列对半导体激光的匀化原理和光束匀化过程, 通过分析微透镜边缘衍射对匀化光斑影响确定了微透镜孔径范围, 采用近轴矩阵光学推导了目标光斑发散角。结合实例对微透镜阵列光束匀化系统进行了仿真和实验验证, 实现了均匀性为91.89%的均匀光斑。

关键词 激光光学; 半导体激光器堆栈; 微透镜阵列; 光束匀化; 光斑均匀性

中图分类号 TN248.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0502009

Homogenization System for Diode Laser Stack Beams Based on Microlens Array

Lei Chengqiang¹ Wang Yuefeng¹ Yin Zhiyong² Yin Shaoyun³ Sun Xiuhui³

¹Department of Electronic and Optics Engineering, Ordnance Engineering College,

Shijiazhuang, Hebei 050003, China

²Department of Space Command, Academy of Equipment, Beijing 101416, China

³Integrated Optics and Electronic Center, Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology,

Chinese Academy of Science, Chongqing 400714, China

Abstract The intensity distribution of diode laser is not uniform due to the broad-area and ridge-waveguide designs, the poor beam quality is the limiting factor of applications. In order to achieve homogenized spot by the beam shaping of high-power diode laser stack, a homogenization system for diode laser stack beams based on microlens array is designed. The diode laser beam shaping theory and process of microlens array are analyzed. The lower limit of clear aperture of microlens is confirmed by the analysis of the impact of the diffraction of microlens edge on the spot homogeneity. The intensity angle distribution of spot is defined by paraxial matrix optical analysis. The simulation and experimental test are carried out for the microlens array beam shaping system, realizing the spot with the homogeneity of 91.89%.

Key words laser optics; diode laser stack; microlens array; beam homogenization; spot homogeneity

OCIS codes 140.2010; 140.3300; 220.4830

1 引 言

大功率半导体激光器因其具有体积小、重量轻、光电转换效率高、使用寿命长等优点有着越来越广泛的应用前景^[1-3]。当前实用化的半导体激光器受限于其自身波导结构的限制, 快慢轴方向发散角较大且不对

收稿日期: 2014-11-18; 收到修改稿日期: 2015-01-15

基金项目: 国家863计划

作者简介: 雷呈强(1987—), 男, 博士研究生, 主要从事半导体激光光束整形、固体激光技术等方面的研究。

E-mail: lcqguangxue@163.com

导师简介: 汪岳峰(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事固体激光器、光电检测技术等方面的研究。

E-mail: wyf_oec@163.com

称,输出光束近似为带有像散的椭圆高斯光束,导致光强分布不均匀^[4-5]。提高光束质量对半导体激光器的应用至关重要,尤其是大功率的半导体激光器堆栈,依靠增加发光单元数量来提高功率但总是伴随着光束质量的下降。因此,必须对半导体激光器输出光束进行整形,以满足实际应用需求^[6-7]。当前,常用的方法是采用空心导管基于内壁反射的方法获得均匀光斑,其主要缺点是系统体积较大、且经过空心导管耦合后光束发散角增大^[8-9];相比空心导管、波导管等非成像光束匀化器件,基于微透镜阵列的光束匀化系统体积小,能量传输效率高,可实现一定的焦深^[10-13]。本文在微透镜阵列半导体激光光束匀化机制的分析基础上,通过微透镜的边缘衍射确定了匀化微透镜的孔径范围,采用近轴矩阵光学推导了目标光斑发散角,结合实例对微透镜阵列光束匀化系统进行了仿真并进行了实验验证。

2 微透镜阵列半导体激光光束匀化机制

2.1 匀化原理

微透镜阵列光束匀化系统主要由两个部分构成:将入射光束分成大量细光束的双列微透镜阵列(LA1和LA2)和使各子光束在目标面(FP)上叠加的积分透镜(FL),其原理如图1所示。在双列微透镜阵列中,第一列任意一微透镜与第二列中对应位置的微透镜组成一个通道,每个通道成为分割光束的重要单元元件。在每一通道中两微透镜的参数完全相同,且通道的长度正好等于微透镜的焦距。第一列微透镜阵列将入射光分割为一系列子光束,每个子光束与微透镜阵列中的子透镜孔径相对应,这些子光束经第一子透镜聚焦至对应的第二子透镜孔径上并通过第二子透镜后入射到积分透镜孔径,从而完成在各自通道内的传输,如图2所示。所有的子光束通过积分透镜后将在后焦面重合,每个子光束范围内的微小不均匀性将在重合的过程被平滑从而获得均匀光斑。

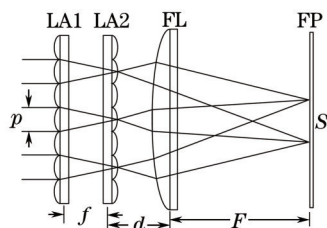


图1 微透镜阵列匀化系统原理图

Fig.1 Schematic diagram of homogenizing system based on the microlens array

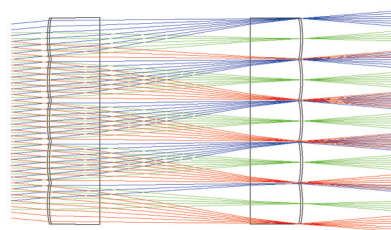


图2 入射光束经微透镜阵列分束

Fig.2 Incident beam splitted by microlens array

由上述分析可以看出,微透镜阵列匀化系统能够实现半导体激光光束匀化,原因有以下3点:1)微透镜阵列凭借大量子透镜将入射光束分割成一系列细光束,因为细光束的光强分布只是入射光束分布中的一小部分,所以局部均匀性必然高于整体均匀性;2)对被轴对称的两片微透镜分割得到的一对细光束进行分析。每一细光束的光强分布都不够均匀,但两细光束的光强变化过程呈镜面对称。当两细光束在目标平面处会聚叠加时,光强分布由于彼此互补而变得更加平滑;3)所有被微透镜阵列分割得到的大量细光束都在目标平面处会聚,每一点处的光强都是所有细光束在这一点处的光强叠加,相当于积分过程,消除了部分光束的不均匀对整体光强分布的影响。由微透镜阵列匀化光束原理以及匀化系统结构参数得到抽运光斑尺寸 s 如(1)式所示^[14]。

$$s = \frac{F}{f} p \approx 2F \cdot R_{NA}, \quad (1)$$

式中 p 、 f 、 R_{NA} 分别为微透镜阵列中各个子透镜的孔径、焦距和数值孔径, F 为积分透镜的焦距。

2.2 光束匀化过程

以10 Bar条半导体激光器堆栈经过该匀化系统实现20 mm×20 mm方形均匀光斑为例,半导体激光器堆栈快轴方向经过预准直后发散角为1°,慢轴方向发散角10°,设定微透镜孔径大小为340 μm×340 μm,数值孔径为0.09,积分透镜焦距为111.11 mm。通过在微透镜阵列匀化系统中不同位置处采集光强分布,分析微透镜阵列半导体激光光束匀化过程。

图3~5所示为在匀化系统中不同位置处采集的光强分布图,其中(a)图均为二维光强分布,(b)、(c)图分别为沿快轴方向与慢轴方向的光强分布。通过对匀化系统三个典型位置处光强分布变化的分析,完整地展现了10个Bar条半导体激光器堆栈光束均匀化的全过程。如图3所示,由于快轴方向光束预准直缘故,光强分布上能清晰反映出10个Bar条垂直排列,在快轴方向上,由于光束经准直后剩余发散角非常小,光强分布呈“梳状”排列,可以明显地看到明暗变化规律;而慢轴方向大量的发光单元出射的光束已经叠加在一起,已近似成线光源。如图4所示,入射激光光束被双列微透镜阵列分割成大量的细光束,已初步具有矩形光斑轮廓但光强分布非常不均匀。如图5所示,大量细光束经积分透镜会聚后在目标平面处进行叠加,最终得到高均匀的矩形光斑。

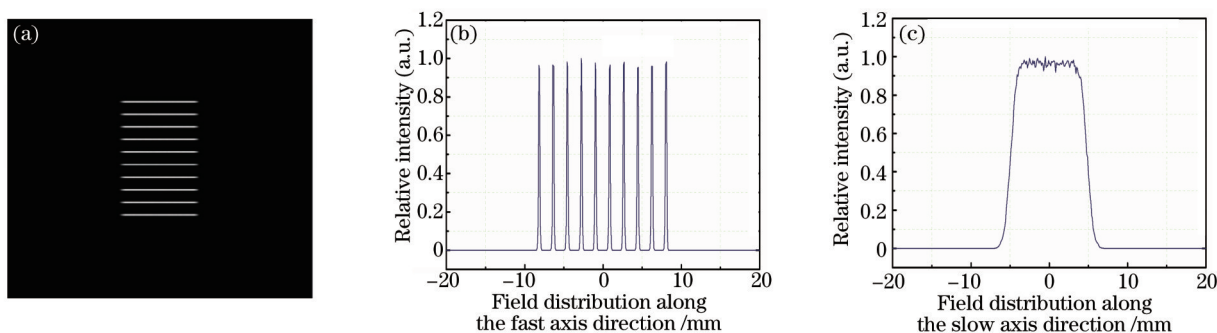


图3 带快轴准直的激光二极管阵列光强分布。(a) 光强分布; (b) 快轴方向; (c) 慢轴方向

Fig.3 Field intensity distribution of laser diode with fast axis beam collimation. (a) Intensity distribution; (b) fast axis direction; (c) slow axis direction

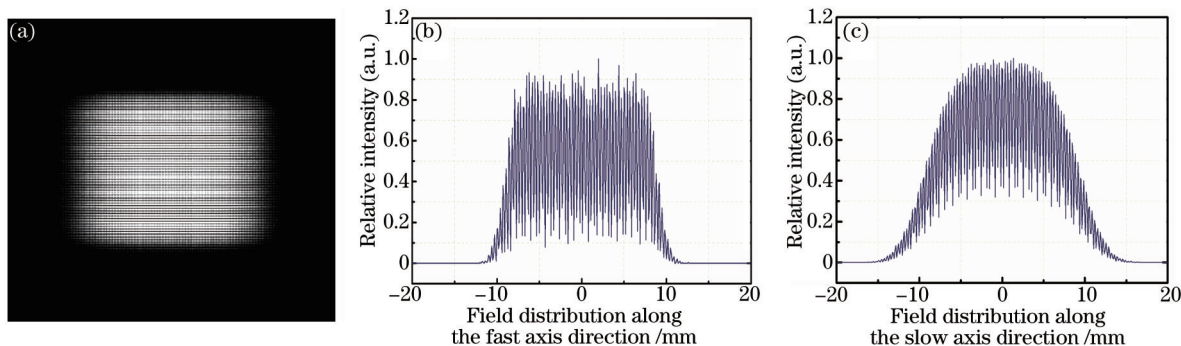


图4 入射光束被微透镜阵列分割后的光强分布。(a) 光强分布; (b) 快轴方向; (c) 慢轴方向

Fig.4 Intensity distribution after the beam segment with the microlens arrays. (a) Intensity distribution; (b) fast axis direction; (c) slow axis direction

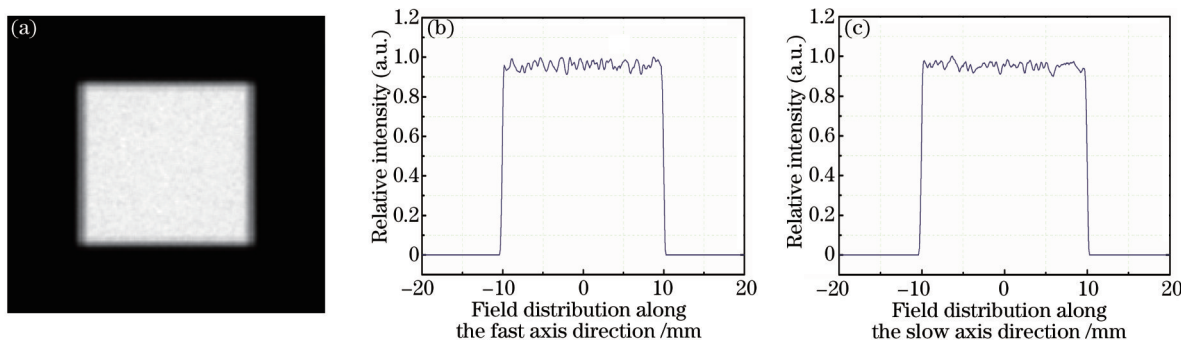


图5 目标平面处的最终光强分布。(a) 光强分布; (b) 快轴方向; (c) 慢轴方向

Fig.5 Field intensity distribution at the target plane. (a) Intensity distribution; (b) fast axis direction; (c) slow axis direction

3 微透镜及其孔径选择

通过上述微透镜阵列半导体激光光束匀化机制分析可知,微透镜阵列匀化系统主要通过先分束而后积

分叠加的方式对光束进行匀化,在这一过程中不均匀成分得到了平滑,均匀性得到了提高。表面上分割光束的子透镜数量越多得到的光斑均匀性越好,但在半导体激光器堆栈面积一定的情况下,子透镜数量越多意味着其口径越小,这样目标光斑会因单微透镜的衍射效应影响而导致光强分布锐利程度下降。所以,在设计微透镜口径时应充分考虑衍射效应对匀化光斑的影响,而非涅耳数是评估微透镜衍射效应对目标光斑均匀性干扰程度的有效参数^[15]。

菲涅耳数等于光程差(l_{OPD})对应的半波数量,其表达式为^[14]

$$N_F = 2 \times l_{OPD} = \frac{r^2}{\lambda} \left(\frac{1}{R_w} - \frac{1}{R_0} \right), \quad (2)$$

式中 R_w 为波前面的曲率半径, R_0 为聚焦透镜的曲率半径, r 为子孔径半径, λ 为入射光波波长。对应于微透镜阵列匀化系统有 $1/R_w = 1/f + 1/F$, $1/R_0 = 1/F$, $r = p/2$, 其中 p 、 f 分别为微透镜阵列中各个子透镜的孔径和焦距, F 为积分透镜的焦距, 将 R_w 、 R_0 及 r 值代入(2)式可得:

$$N_F = \frac{p^2}{4\lambda f}. \quad (3)$$

为了准确设计微透镜阵列匀化系统,减小微透镜口径边缘衍射对匀化光斑的影响,微透镜菲涅耳数 N_F 至少要大于 10。同时为保证入射光束完全进入匀化系统并在相应的通道内完成光束分割,光束入射角度的正切值不得超过微透镜的数值孔径,即有

$$\begin{cases} \frac{p^2}{4\lambda f} \geq 10 \\ \frac{p}{2f} \geq \tan \alpha \end{cases}, \quad (4)$$

式中 α 为入射光束的发散角半角。综上所述,即可确定用于匀化的微透镜口径范围。

4 匀化系统

基于微透镜阵列的半导体激光器堆栈匀化系统框图如图 6 所示,该匀化系统由带有快轴(FA)准直器半导体激光器堆栈、双列微透镜阵列以及积分透镜组成。其中,双列微透镜阵列用于分割光束,将入射光束分割成大量细光束;积分透镜用于细光束积分叠加,将大量细光束会聚叠加在焦平面处,从而实现均匀光斑。

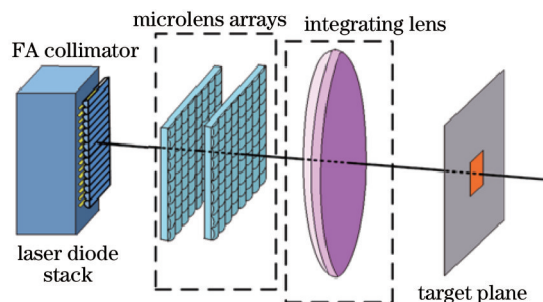


图 6 微透镜阵列匀化系统框图

Fig.6 Diagram of homogenizing system based on microlens array

4.1 光斑发散角

对半导体激光器堆栈匀化系统而言,除了目标面上的光强均匀性外,光斑的发散角分布是影响其应用的另一重要因素。利用 ABCD 变换矩阵推导半导体激光光束经分束积分后的发散角,如图 7 所示。每个微透镜的孔径为 p , 两列微透镜阵列之间的距离为子透镜的焦距 f , 后列微透镜阵列与积分透镜的间距为 d , 积分透镜的焦距为 F 。其中设微透镜阵列的阵列总数为 N , 且 N 常为奇数以使得中心的透镜单元光束位于中心位置, 两侧透镜阵列的光束也在中心位置叠加以实现均匀化。

设入射光束位于第 n 级子透镜的光束孔径内, 其入射角 θ_1 , 位置 x_1 , 则根据近轴矩阵光学 ABCD 定律在成像面上有

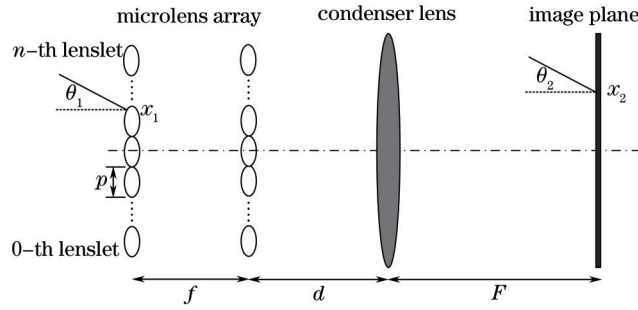


图7 微透镜阵列光束积分器的近轴矩阵光学分析

Fig.7 Paraxial matrix optical layout of microlens array beam integrator

$$\begin{pmatrix} x_2 \\ \theta_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & F \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{F} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} np \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & f \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ \theta_1 \end{pmatrix}. \quad (5)$$

计算得到

$$\begin{pmatrix} x_2 \\ \theta_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{F}{f}x_1 \\ \frac{x_1}{f}\left(\frac{d}{F}-1\right) - \frac{1}{F}(\theta_1 f + np) \end{pmatrix}. \quad (6)$$

假定最大入射角 $\theta_{1\max}$ 等于透镜阵列的数值孔径 $R_{NA} = p/2f$,最大入射光线高度 $x_{1\max} = p/2$,则在第 n 级子透镜的光束孔径内成像面上的最大发散角半角 $\theta_{2\max}$ 和最大成像光斑半径 $x_{2\max}$ 可表示为

$$\begin{pmatrix} x_{2\max} \\ \theta_{2\max} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{pF}{2f} \\ \frac{p}{2f}\left(\frac{d}{F}-1\right) - \frac{p}{F}\left(\frac{1}{2}+n\right) \end{pmatrix}. \quad (7)$$

分析(6)、(7)式可知,在第 n 级子透镜光束口径内, $d = F$ 时在积分透镜后焦面叠加的各细光束的主光线都与目标平面垂直,因而得到最小发散角; $d=0$ 时能获得最短的系统长度,但会增大匀化光斑发散角^[6],以15 Bar 条半导体激光器堆栈匀化系统为例, d 分别取上述两种不同值时的匀化光斑发散角如图8所示。为均衡系统性能,实际应用中一般取 $0 \leq d \leq F$,整个光斑的发散角半角可以由下式计算:

$$\theta_{\text{divp}} = \max \left| \frac{p}{2f}\left(\frac{d}{F}-1\right) - \frac{p}{F}\left(\frac{1}{2}+n\right) \right|, \quad n = \left[0, \frac{N-1}{2} \right]. \quad (8)$$

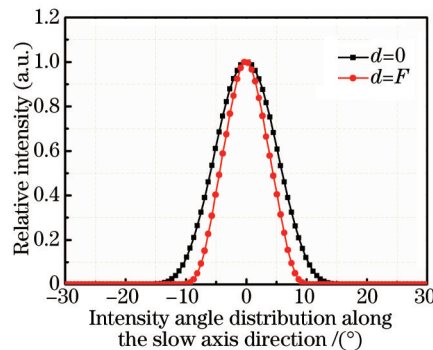


图8 微透镜阵列与积分透镜间距变化对匀化光斑发散角影响

Fig.8 Effect of different distances between microlens array and field lens on divergence of spot

4.2 仿真结果

以808 nm连续激光输出15 Bar 条半导体激光器堆栈为例对上述微透镜阵列匀化系统进行仿真,其快轴方向经过预准直后发散角为 1° ,慢轴方向发散角 10° ,通过(4)式设定微透镜孔径大小为 $200 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$,数值孔径为0.09,积分透镜焦距为66.67 mm。

仿真光斑如图9所示,由图可知:通过系统仿真,得到一大大小为 $12 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$ 均匀方形光斑,其快慢轴

方向光场均为平顶分布,光强分布不均匀性为 5.15%。由于半导体激光器堆栈快慢轴发散角不同,两个方向上实际使用的子透镜阵列数 N 也不一样,其中慢轴方向上 $N_x=101$,快轴方向上 $N_y=131$,后列微透镜阵列与积分透镜的间距 $d=20$ mm,将上述参数代入(8)式可得匀化光斑快慢轴方向上的最大发散角半角分别为 14.8° 和 12.3° 。图 10 所示为匀化光斑快慢轴方向沿角度的辐照度分布,由图中可以看出光斑快轴方向最大发散角半角为 15.3° ,其中 10% 最大光强处发散角半角为 14.1° ;光斑慢轴方向最大发散角半角为 12.5° ,其中 10% 最大光强处发散角半角为 8.4° ,与理论计算值基本一致。

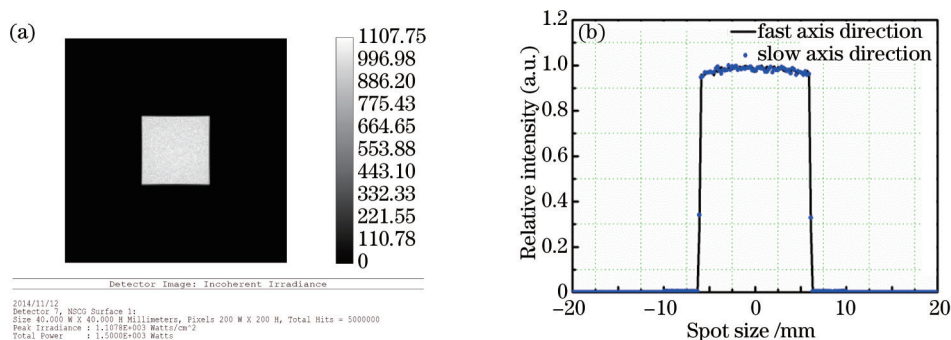


图 9 仿真目标平面处光强分布。(a) 仿真光斑强度分布;(b) 仿真光斑快慢轴方向强度分布

Fig.9 Simulation of intensity distribution test at the target plane. (a) Simulation of spot field distribution;

(b) simulation of spot field distribution in the fast and slow axis directions

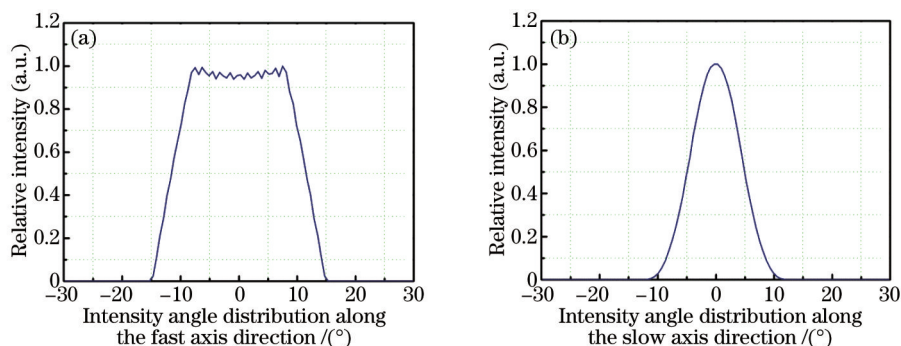


图 10 光斑强度沿角度分布。(a) 快轴方向;(b) 慢轴方向

Fig.10 Intensity distribution of spot along angle. (a) Fast axis; (b) slow axis

5 实验与讨论

对系统进行实验验证并对获得的光斑光强分布进行测试。通过 CCD 拍摄得到的光斑图样如图 11(a)所示,其快慢轴方向的光场分布如图 11(b)所示。光斑整体成方形,中心区域与仿真结果一致为平顶型分布,其尺寸约为 $12\text{ mm}\times 12\text{ mm}$,光强分布不均匀性为 8.11%;但光斑四周并不锐利,有明显的光强下降边缘,且最大光强一半处测得的光斑尺寸约为 $15\text{ mm}\times 15\text{ mm}$,相比设计值和仿真值都有所增加。经分析可知,这是由于微透镜阵列间距误差所导致。当间距等于微透镜焦距时,经微透镜阵列出射的所有细光束的主光线都为平行光束,则所有细光束经积分透镜后,在焦面叠加形成的光斑中心重合,目标平面上的光场呈平顶型分布;当间距不等于微透镜焦距时,造成各细光束扩展光斑中心不再重合,最终导致目标面上匀化光斑出现光强下降边缘,且光斑尺寸随着间距的增大而减小。微透镜阵列间距误差对匀化光斑的影响如图 12 所示,由上述微透镜阵列孔径和数值孔径大小可知微透镜焦距 $f=1.11\text{ mm}$,取间距 D 相比微透镜焦距 f 误差范围在 $\pm 0.3\text{ mm}$ 为例进行分析:当间距等于微透镜焦距时,匀化光斑呈平顶型分布;当间距大于微透镜焦距时,峰值光强增大,光斑尺寸变小,出现光强下降边缘;当间距小于微透镜焦距时,峰值光强减小,光斑尺寸变大,出现光强下降边缘。

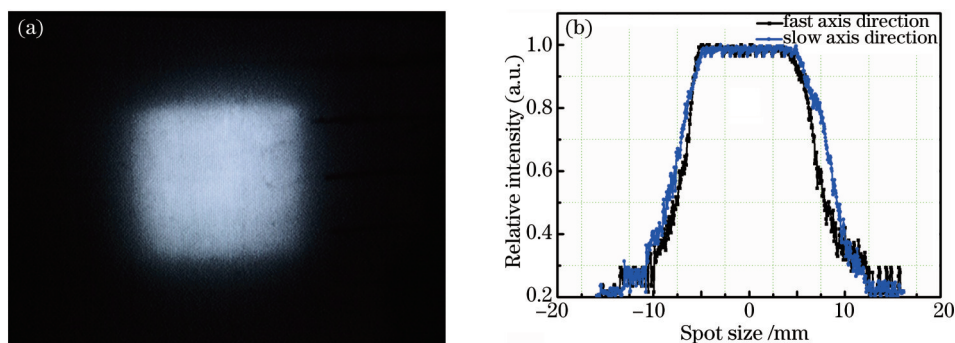


图 11 目标平面处光强分布。(a) 实验光斑强度分布；(b) 实验光斑快慢轴方向强度分布

Fig.11 Intensity distribution test at the target plane. (a) Test of the spot field distribution;

(b) test of the spot field distribution in fast and slow axis direction

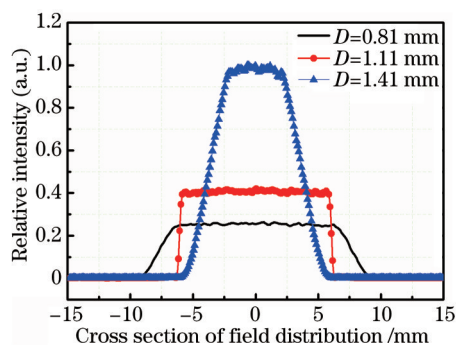


图 12 微透镜阵列间距对目标平面处光场分布影响

Fig.12 Effect of different distances between microlens arrays on intensity distribution

6 结 论

半导体激光器由于自身波导结构的不对称性导致输出光束光强分布不均匀而限制了其应用。为了对半导体激光光束进行整形以获得均匀光斑,设计了一种基于微透镜阵列的半导体激光器堆栈光束匀化系统。在微透镜阵列对半导体激光光束匀化机制的分析基础上,通过微透镜边缘衍射对匀化光斑影响确定了微透镜孔径范围,并利用 ABCD 变换矩阵推导了目标光斑发散角。结合实例对微透镜阵列光束匀化系统进行了仿真和实验验证,实现了均匀性为 91.89% 的均匀光斑。实验中发现双列微透镜阵列的间距误差对目标光斑均匀性影响较大,在实验装调中应特别注意。

参 考 文 献

- 1 Fan T Y, Byer R L. Diode laser-pumped solid-state lasers[J]. IEEE J Quantum Electron, 1988, 24(6): 895-912.
- 2 Robin K Huang, Bien Chann, Leo J Missaggia, *et al.*. High-brightness wavelength beam combined semiconductor laser diode arrays [J]. IEEE Photonic Technol Lett, 2007, 19(4): 209-211.
- 3 Andre Timmermann, Jens Meinschien, Peter Bruns, *et al.*. Next generation high-brightness diode lasers offer new industrial applications[C]. SPIE, 2008, 6876: 6876U.
- 4 F Bachmann, P Loosen, R Poprawe. High Power Diode Lasers[M]. New York: Springer, 2007.
- 5 S Haiyin. Laser Diode Beam Basics, Manipulations and Characterizations[M]. New York: Springer, 2012.
- 6 Peng Hangyu, Gu Yuanyuan, Shan Xiaonan, *et al.*. Study on beam shaping of high power diode lasers[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38 (2): 0202010.
彭航宇, 顾媛媛, 单肖楠, 等. 大功率半导体激光光源光束整形技术研究[J]. 中国激光, 2011, 38(2): 0202010.
- 7 Zhang Jun, Peng Hangyu, Liu Yun, *et al.*. High brightness diode laser source based on three-wavelength multiplexing[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(4): 0402011.
张 俊, 彭航宇, 刘 云, 等. 三波长合束高亮度半导体激光光源[J]. 中国激光, 2013, 40(4): 0402011.
- 8 Gao Hongyun, Fu Rulian, Qin Hua, *et al.*. Novel coupling system in solid state laser end-pumped by LDA-taper duct[J]. Journal of

- Optoelectronics • Laser, 2006, 17(4): 419–423.
- 郜洪云, 傅汝廉, 秦 华, 等. LDA端泵浦固体激光器的新型耦合系统—圆锥形导管[J]. 光电子·激光, 2006, 17(4): 419–423.
- 9 Liu Xiaojuan, Fu Rulian, Qin Hua, *et al.*. Theoretical and experimental research on lens duct for LDA coupling[J]. Optics and Precision Engineering, 2006, 14(2): 167–172.
- 刘晓娟, 傅汝廉, 秦 华, 等. LDA耦合系统透镜导管的理论与实验研究[J]. 光学精密工程, 2006, 14(2): 167–172.
- 10 P Schreiber, P Dannberg, B Hofer, *et al.*. Chirped microlens arrays for diode laser circularization and beam expansion[C]. SPIE, 2005, 5876: 58760K.
- 11 F Wippermann, U D Zeitner, P Dannberg, *et al.*. Beam homogenizers based on chirped microlens arrays[J]. Optics Express, 2007, 15(10): 6218–623.
- 12 Yin Zhiyong, Wang Yuefeng, Jia Wenwu, *et al.*. Performance analysis of beam integrator system based on microlens array[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(7): 0702007.
- 殷智勇, 汪岳峰, 贾文武, 等. 基于微透镜阵列的光束积分系统的性能分析[J]. 中国激光, 2012, 39(7): 0702007.
- 13 Liu Zihui, Yang Huan, Shi Zhendong, *et al.*. Homogenization of the semiconductor laser planar array using diffractive micro-lens array[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(1): 0102005.
- 刘志辉, 杨 欢, 石振东, 等. 衍射微透镜阵列用于面阵半导体激光光束匀化[J]. 中国激光, 2012, 39(7): 0102005.
- 14 Dickey F M, Holswade S C. Laser Beam Shaping: Theory and Techniques[M]. New York: Marcel Dekker Inc, 2000: 276–279.
- 15 Dickey F M. Laserbeam Shaping Application[M]. New York: Taylor & Francis Group, 2006.
- 16 Peter Schreiber, Sergey Kudaev, Peter Dannberg, *et al.*. Homogeneous LED-illumination using microlens arrays[C]. SPIE, 2005, 5942: 59420K.

栏目编辑: 宋梅梅